

Bionik

Unbegrenzte Mobilität ohne Energieaufwand: der dynamische Segelflug der Albatrosse

Albatrosse fliegen Tausende von Kilometern ohne Energieaufwand. Wie dies möglich ist, haben Wissenschaftler mit Berechnungen und bei Feldversuchen im südindischen Ozean gezeigt.

VON GOTTFRIED SACHS

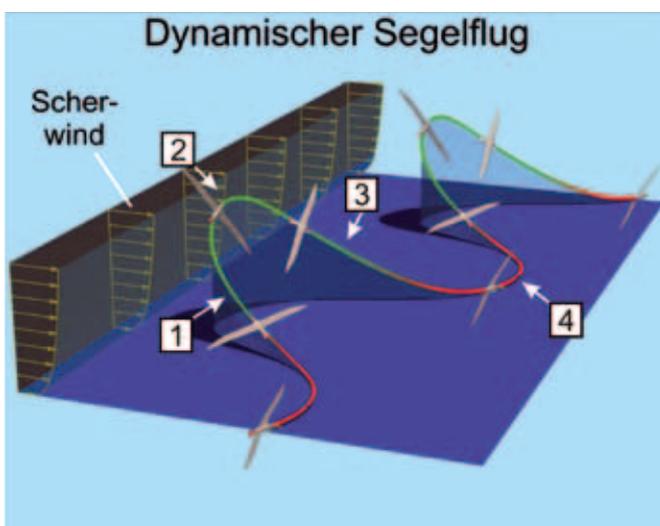
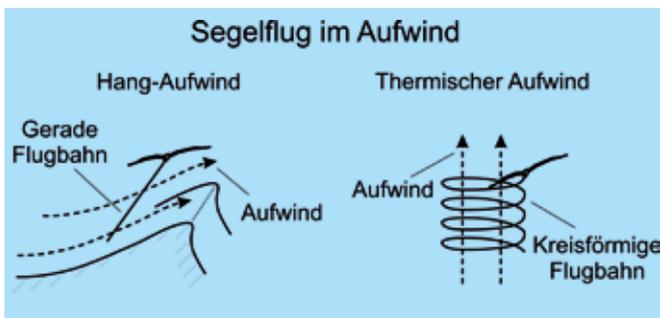
DER FLUG DER VÖGEL hat die Menschen seit jeher fasziniert. Dies gilt in besondere Weise für den dynamischen Segelflug der Albatrosse, der ihnen unbegrenzte Mobilität ohne Energieaufwand ermöglicht. Der dynamische Segelflug erlaubt es dem Vogel, Energie aus dem horizontalen Wind über dem Meer zu entnehmen und somit die Verluste infolge des aerodynamischen Widerstandes auszugleichen. Untersuchungen über die großräumigen Flugbewegungen der

Albatrosse haben gezeigt, dass diese Seevögel Flugstrecken von bis zu 15.200 km zurücklegen oder die Welt in 46 Tagen umrunden.

Was ist das Geheimnis des Albatros-Fluges und was sind die physikalischen Zusammenhänge, die diese enormen Flugleistungen ermöglichen? Diese Fragen, die seit längerer Zeit Gegenstand der ornithologischen Forschung sind, wurden in zahlreichen theoretischen und experimentellen

Untersuchungen behandelt – mit dem Ergebnis, dass es eine Reihe unterschiedlicher und kontroverser Theorien und Erklärungen gibt. Klarheit über den dynamischen Segelflug kann mit experimentellen Daten über die kleinräumigen Flugmanöver der Albatrosse erzielt werden, aus denen diese Form des Segelfluges besteht.

Abb. 1: Segelflugformen für einen Energiegewinn im Aufwind und im Horizontalwind.



Prinzip des dynamischen Segelfluges

Der dynamische Segelflug besteht aus einem sich wiederholenden, hochgradig instationären Flugmanöver, bei dem der Vogel Kurvenflüge in Kombination mit Steig- und Sinkflügen unter großen Änderungen in der Fluggeschwindigkeit ausführt. Die Gegenüberstellung mit dem vergleichsweise einfachen Flug in einem Aufwind, den Vögel ebenfalls zum Energiegewinn aus der Bewegung der Luft nutzen, macht die Komplexität des dynamischen Segelfluges deutlich. Wie

Abb. 2: GPS-Empfänger, Gehäuse und Albatros mit Messgerät.

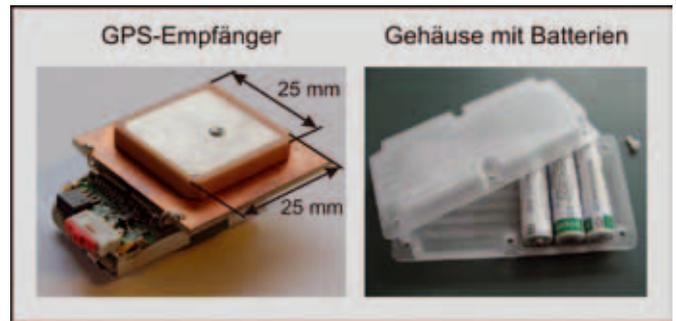
Abb. 1 oben zeigt, erfolgt der Flug in einem Aufwind als Geradeaus- oder Kurvenflug. Der Geradeausflug wird bei Hang- oder Wellenaufwind und der Kurvenflug in Aufwindgebieten mit Thermik praktiziert. Aus der Abbildung ist unmittelbar ersichtlich, dass man den Energietransfer so deuten kann, als ob die aufwärts strömende Luft den Vogel mit nach oben hebt.

Ein derart direkter Energietransfer ist bei einem Flug in einem Horizontalwind jedoch nicht möglich. Hier ist vielmehr ein dynamisches Flugmanöver erforderlich, um einen Energiegewinn zu erzielen. Außerdem kann in einem Horizontalwindgebiet nicht fortwährend Energie zugeführt werden, sondern es wechseln sich Phasen mit positivem und negativem Energietransfer ab. Die grundsätzlichen Zusammenhänge des dynamischen Segelfluges lassen sich anhand der Abbildung 1 (unten) erläutern, wobei der Vogel im Vergleich zur Flugbahn größer wiedergegeben ist. Danach besteht der dynamische Segelflug aus einer Flugbewegung mit sich wiederholenden Zyklen, von denen hier zwei dargestellt sind. Ein einzelner Zyklus lässt sich wiederum in vier charakteristische Phasen unterteilen:

1. Steigflug (Flug gegen den Wind)
2. Obere Kurve (Ziel: Flug mit dem Wind)
3. Sinkflug (Flug mit dem Wind)
4. Untere Kurve (Ziel: Flug gegen den Wind)

Weiter ist in Abbildung 1 das als Scherwind bezeichnete Windprofil in der Höhenschicht über dem Meer gezeigt. Danach ist die Windgeschwindigkeit unmittelbar über der Meeresoberfläche sehr klein und nimmt mit der Höhe stark zu.

Die Energiegewinnung beim dynamischen Segelflug lässt sich nun als ein Zusammenspiel zwischen Flugbahnverlauf und Windprofil deuten. Durch den Steigflug 1 (Abb. 1) erreicht der Vogel ein Gebiet großer Windgeschwindigkeit am oberen Ende der Höhenschicht. Hier führt er durch den Kurvenflug 2 eine Richtungsumkehr von einer Bewegung gegen den Wind in eine solche mit dem Wind aus. Dadurch wird der Vogel vom Wind beschleunigt, also quasi vom Wind mitgenommen.



Diese Mitnahme ist gleichbedeutend mit einem Gewinn an kinetischer Energie (grüner Bahnteil in Abb. 1). Der anschließende Sinkflug 3 dient dazu, den gegensinnigen Kurvenflug in einer niedrigen Höhe mit möglichst geringer Windgeschwindigkeit ausführen zu können. Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeit können die Verluste in der unteren Kurve 4 (roter Bahnteil in Abb. 1) möglichst klein gehalten werden.

Der dynamische Segelflug war Gegenstand von theoretischen Untersuchungen am Lehrstuhl für Flugmechanik und Flugregelung der TU München. Die hierbei mittels leistungsfähiger Optimierungsmethoden gewonnenen Erkenntnisse führten zu dem geschilderten Ergebnis über das Prinzip des dynamischen Segelfluges. Dieses Prinzip konnte mit Versuchen an frei fliegenden Albatrossen experimentell bestätigt werden, über die im Folgenden berichtet wird.

Hochgenaue Bahnbestimmung

Die experimentelle Bestimmung des dynamischen Segelfluges von Albatrossen setzt eine genaue Bahnmessung voraus. Hierfür sind sowohl eine hohe Präzision in der Positionsbestimmung als auch eine große Aufzeichnungsrate erforderlich. Da die Messungen direkt am frei fliegenden Vogel erfolgten, war ein miniaturisiertes Messgerät notwendig, das in Größe, Gewicht und Robustheit (Salzwasser) für diesen Zweck geeignet war.

DER AUTOR

Prof. Dr.-Ing. Gottfried Sachs ist ehem. Ordinarius für Flugmechanik und Flugregelung an der TU München. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen u. a. Flugleistungen und Flugeigenschaften sowie Flugregelung und Flugführung von Luftfahrzeugen, ferner den Hyperschallflug und Raumtransportsysteme sowie die Flugbahnoptimierung zur Leistungssteigerung und Treibstoff einsparung. Er ist Vizepräsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Das Ziel der hochgenauen Flugbahnbestimmung erforderte ein neues Verfahren zur Positionsbestimmung aus GPS-Daten. Hierfür wurde eine Methode entwickelt, die kinematische L1-Trägerphasen-Messungen verwendet. Damit ist es möglich, die mittels Ein-Frequenz-Empfängern erzielbare relative Genauigkeit vom Meter- in den niedrigen Dezimeterbereich zu verbessern. Dies wird durch die Nachbearbeitung der GPS-Rohdaten in einem auf Zeitdifferenzen beruhenden Verfahren erreicht.

Kernstück des miniaturisierten Messgeräts ist ein GPS-Empfänger, der eine hinreichend hohe Aufzeichnungsrates von 10 Hertz aufweist. Dieser GPS-Empfänger mit zugehöriger Patchantenne und Bodenplatte wiegt 18,4 g (Abb. 2). Über eine Speicherkarte steht eine Kapazität von 2 GB für die Aufzeichnung der Messdaten zur Verfügung, die Stromversorgung erfolgt mit bis zu drei Batterien. Das vollständige Messgerät ist in einem wasserdichten Gehäuse untergebracht, das in Abbildung 2 mit Batterien dargestellt ist. In seiner



Abb. 3: Fast 5.000 Kilometer in sechs Tagen: aufgezeichnete Flugbahn eines Albatros.

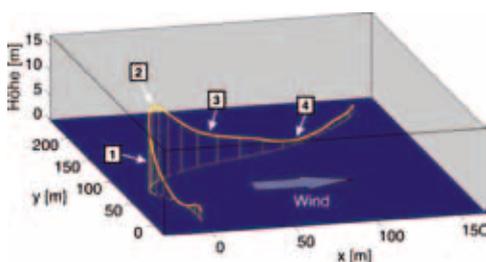


Abb. 4: Zyklus des dynamischen Segelfluges aus den Flugmessungen mit einem Albatros.

schwersten Version wiegt das Gerät 103 g, wobei die Batterien den Hauptteil ausmachen.

Das Messgerät wurde am Rücken des Vogels angebracht (Abb. 2). Sowohl sein Gewicht – weniger als 1,5 % des Vogelgewichtes – als auch die Art seiner Anbringung genügen ornithologischen Vorgaben, wie sie für derartige Zwecke üblich sind.

Feldversuche im südindischen Ozean

Die Feldversuche fanden während eines dreimonatigen Forschungsaufenthaltes auf dem Kerguelen-Archipel im südindischen Ozean statt. Insgesamt wurden an 20 Albatrossen Messgeräte angebracht, von denen 16 nutzbare Daten aus Flugmessungen lieferten. Die experimentellen Forschungsarbeiten erfolgten in Kooperation mit dem Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive des französischen Nationalen Zentrums für wissenschaftliche Forschung CNRS und wurden vom Institut Polaire Français Paul Emile Victor unterstützt.

Ein Ergebnis der Flugbahnmessungen ist in Abbildung 3 dargestellt, die den längsten aller aufgezeichneten Flüge wiedergibt und damit eindrucksvoll das enorme Flugleistungsvermögen der Albatrosse bestätigt. Die Länge der Flugstrecke beträgt 4.850 km, die der Vogel in sechs Tagen zurücklegte. Danach konnte die Datenaufzeichnung nicht mehr fortgeführt werden, da die Batterien leer waren. Der Vogel flog jedoch weiter und kehrte erst nach insgesamt 30 Tagen zum Nest zurück. Das Messgerät erwies sich nach der langen Reise als vollständig intakt, die Daten konnten problemlos ausgelesen werden.

In Abbildung 3 ist auf einer globalen Skala die großräumige Flugbewegung wiedergegeben, die sich über Tausende von Kilometern erstreckt. Damit ist es jedoch noch nicht möglich, die kleinräumigen Flugmanöver zu erkennen, aus denen der dynamische Segelflug besteht. Hierfür ist eine höhere Auflösung in der bildlichen Wiedergabe erforderlich, die Flugbewegungen im Bereich von wenigen 100 m sichtbar macht.

In einer perspektivischen Darstellung eines kleinräumigen Flugmanövers zeigt Abbildung 4 einen Zyklus des dynamischen Segelfluges. Die Phasen 1 bis 4 sind deutlich zu erkennen und stimmen mit der obigen Prinzipbetrachtung überein. Dies gilt insbesondere für die obere Kurve 2, die für den Energiegewinn maßgeblich ist, sowie ihre Relation zum Wind.

WWW

Über den Link kann ein .kmz-File für Google Earth heruntergeladen werden. Damit ist eine interaktive dreidimensionale Visualisierung des dynamischen Segelfluges eines Albatrosses aus den beschriebenen Flugmessungen möglich.

http://www.fsd.mw.tum.de/index.php?option=com_content&task=view&id=200